

# 不同应力路径下煤样变形破坏过程 声发射特征的试验研究

苏承东<sup>1</sup>, 高保彬<sup>1,2</sup>, 南 华<sup>1</sup>, 李小军<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 利用 RMT - 150B 岩石力学试验机对义马耿村具有冲击倾向性煤样进行常规单轴、三轴和三轴卸围压试验, 研究在不同应力路径下煤样变形破坏过程中的声发射特征。试验结果表明, 煤样在不同应力路径下加载变形破坏过程中产生的声发射特征有所差异。常规单轴压缩过程中各个阶段均有不同程度的声发射事件, 与三轴筒内单轴压缩相比, 声发射累计计数和能量明显偏大, 破坏瞬时的声发射计数和能量大致相当; 常规三轴压缩试验时, 在围压作用下煤样屈服前声发射事件较少, 进入屈服阶段声发射事件逐渐趋于活跃, 计数和能量大幅度增大, 标志煤样破坏前兆, 破坏瞬时声发射计数和能量达到最大值; 三轴卸围压试验时, 在卸围压前煤样处于弹性阶段声发射事件较少, 随围压逐渐降低, 由正应力提供的摩擦力不断减小, 煤样内部材料强度相对较低逐步屈服破坏形成微裂纹。屈服前期产生少量声发射事件, 屈服后期声发射事件逐渐趋于活跃, 计数和能量大幅度增大, 标志煤样卸围压破坏前兆, 破坏瞬间计数和能量同时达到最大值, 与常规三轴压缩相比, 声发射计数更大, 能量则更高, 表明三轴卸围压煤样破坏时更加强烈; 常规单轴压缩煤样破坏产生的声发射累计计数和累计能量明显偏大, 三轴筒内单轴、常规三轴压缩以及三轴卸围压试验时, 声发射累计计数和能量大致相同, 没有明显差异。

**关键词:** 岩石力学; 煤样; 应力路径; 声发射; 声发射计数; 声发射能量

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)04 - 0757 - 10

## EXPERIMENTAL STUDY ON ACOUSTIC EMISSION CHARACTERISTICS DURING DEFORMATION AND FAILURE PROCESSES OF COAL SAMPLES UNDER DIFFERENT STRESS PATHS

SU Chengdong<sup>1</sup>, GAO Baobin<sup>1,2</sup>, NAN Hua<sup>1</sup>, LI Xiaojun<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic university, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Based on investigation of acoustic emission(AE) characteristics during deformation and failure process of coal specimens under different stress paths, the general uniaxial compression, triaxial compression and confining pressure reduction experiments were performed by RMT - 150B rock mechanics test system, in which coal specimens were from Gengcun Mine, Yima Mining Group with outburst proneness. Test results indicate that the AE characteristics of coal specimens were different in deformation and failure process under different stress paths. In experiments of general uniaxial compression, AE events of different degrees took place on every stage. Compared with experiments of uniaxial compression in triaxial cylinder, the values of AE counts and energy were

**收稿日期:** 2008 - 10 - 09; **修回日期:** 2008 - 12 - 22

**基金项目:** 教育部高等学校博士点基金资助项目(20070460001); 河南省重点科技攻关资助项目(0424210018)

**作者简介:** 苏承东(1961 - ), 男, 1987年毕业于焦作矿业学院采矿工程系采矿工程专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事采矿工程和岩石力学方面的研究工作。E-mail: sucd@hpu.edu.cn

obviously larger and the momentary values of maximum AE counts and energy at failure were approximately equal. In experiments of general triaxial compression, AE events were fewer before yielding and increased obviously then. At stage of post-yielding, AE events were quite active and enhanced rapidly, which was a sign of failure portent, and the value of AE counts and energy reached maximum at failure instantly. In experiments of confining pressure reduction, AE events were fewer, because the specimens were in elastic stage before confining pressure was relieved. With decreasing confining pressure and friction provided by positive stress, the inner zones of samples with low strength yielded to fail gradually and formed microcracks. AE events occurred in small amount in previous yielding stage, while AE counts and energy were quite active and enhanced rapidly in late yielding stage, which was also a sign of failure portent, and AE counts and energy reached maximum value and failed instantly. Compared with general triaxial compression, the maximum values of AE counts and energy were much larger; and the results indicate that the failure of coal samples in experiments of confining pressure reduction were more violent. In experiments of uniaxial compression in triaxial cylinder, general triaxial compression and confining pressure reduction, AE totalized counts and energy were approximately identical.

**Key words:** rock mechanics; coal specimens; stress paths; acoustic emission(AE); acoustic emission counts; acoustic emission energy

## 1 引言

在荷载作用下岩石类材料变形破坏过程中,其内部将产生微破裂,同时原始裂隙、裂纹不断扩展、汇合贯通,宏观破坏现象是许多微观破坏的综合表现,此期间以弹性波的形式释放应变能的现象称声发射(acoustic emission, AE)。声发射作为一种反映岩石内部状态变化的工具,能够检测到岩石受载过程中裂纹形成或扩展时,造成应力松弛,贮存的部分能量以应力波的形式产生声发射信号,这些信息反映了岩石微观破坏的活动性,它直接与岩石内部缺陷的发展演化有关。通过对岩石的声发射信号的分析,可推断岩石内部的性态变化,反演岩石的破坏机制及破坏程度。通过对不同种类岩石受荷载作用下的声发射规律进行研究,其成果可应用于预测、预报岩石工程破坏进程及地震发生的前兆。

对于岩石声发射特性的研究已经有大量成果发表<sup>[1~17]</sup>。如张晖辉等<sup>[1]</sup>对片麻岩大试件三轴循环载荷下破坏过程的声发射特征进行试验研究;余贤斌等<sup>[2]</sup>对砂岩和石灰岩岩样进行直接拉伸、劈裂与单轴压缩试验的声发射规律进行研究;吴刚和赵震洋<sup>[3]</sup>对岩石类材料加、卸载以及不同卸载方式的声发射特征进行研究;李庶林等<sup>[4]</sup>对3种不同岩石单轴受压岩石破坏全过程中的声发射特征进行研究;张茹等<sup>[5]</sup>研究了花岗岩单轴多级加载岩石破坏声发射特性;李元辉等<sup>[6]</sup>利用岩石破裂过程分析软件

(RFPA<sup>2D</sup>)对3种不同应力路径下岩石试样的声发射特征进行了数值计算,分析不同应力路径对岩石声发射 Kaiser 效应的影响;谢强等<sup>[7, 8]</sup>研究了石灰岩在单轴压缩条件下的声发射特性;刘保县和何学秋<sup>[9]</sup>对重塑煤样单轴压缩变形损伤及声发射特征进行了研究;杨永杰等<sup>[10, 11]</sup>对煤样进行了单轴压缩条件下的声发射特征进行研究;王恩元等<sup>[12]</sup>对煤样进行了单轴压缩煤体破裂过程中声发射的频谱特征研究;窦林名等<sup>[13]</sup>对煤岩体变形破坏过程中的声发射和电磁辐射的规律进行分析研究;张广清等<sup>[14]</sup>研究了围压作用下围压对岩石 Kaiser 效应的影响,得到围压下 Kaiser 效应相对应的应力与岩石所受围压的关系;蒋宇等<sup>[15]</sup>研究了循环荷载作用下岩石疲劳破坏过程中的变形规律和声发射特征;江进辉等<sup>[16]</sup>对大理岩天然含水、浸水饱和和施加渗流岩石单轴压缩下声发射特征进行研究;李俊平和周创兵<sup>[17]</sup>对4种岩石的声发射频谱特征进行研究。

煤作为沉积岩类,同其他种类的岩石一样具有明显的非均质性,煤体中分布着大量的孔隙、裂隙、层理等诸多类型的缺陷,因而加工困难,均质性相对较差,试验结果离散性大,与其他岩石相比,煤样受载变形破坏过程的声发射特征方面的研究相对较少,不同应力路径作用下煤样声发射特征的试验研究成果更少。就煤矿井下煤巷和采场开挖过程而言,开挖面的法向荷载逐步减小,切向荷载则逐步增加,随着开挖进行周围煤体原有应力状态发生变化,煤体承载能力也相应发生变化。在工作面回采过程中,前方煤体受超前移动支承压力以及动压的

影响, 煤体始终处于加卸载作用, 煤层上覆老顶周期性断裂前后有时会造成煤体突然破坏形成冲击地压动力现象, 给煤矿安全生产造成严重威胁。本文试图采用 RMT - 150B 岩石力学试验机对义马耿村具有冲击倾向性煤样进行常规单轴、三轴和三轴卸围压试验, 在煤样轴向加载或卸围压过程中的同时进行声发射同步检测。分析不同应力路径条件下煤样受载变形破坏过程中的声发射特征, 研究成果对进一步揭示煤矿井下巷道、采场周围煤体冲击动力灾害演化过程及灾害发生机制具有重要参考价值。

## 2 煤样特征和试验方法

### 2.1 煤样特征

试验所用煤样采自河南省义马煤业集团耿村煤矿 2 - 1 煤层, 煤种为长焰煤, 煤层平均厚度为 5.5 m, 该煤层具有中等冲击性。为尽可能保持煤样原有的状态, 煤样从工作面煤壁上选取比较完整大煤块, 煤样按照规程的要求, 沿垂直层理方向加工成直径为 50 mm, 长度为 100 mm 的圆柱体煤样, 12 个煤样取自同一大煤块, 煤样两端不平行度小于 0.05 mm, 天然密度为 1 352~1 401 kg/m<sup>3</sup>, 平均密度为 1 372 kg/m<sup>3</sup>。试验前部分煤样结构见图 1, 煤样具有明显层状结构, 端面可以看出内部存在有纵横交错的节理裂隙, 表明裂隙比较发育。



图 1 部分煤样结构照片

Fig.1 Photos of structures of coal specimens

### 2.2 试验设备

试验加载设备采用 RMT - 150B 岩石力学试验系统, 该系统最大轴向加载载荷为 1 000 kN, 围压最大为 45 MPa。全数字计算机自动控制, 采用力、位移、行程多种控制方式, 试验过程实时显示, 试

验数据自动采集。声发射测试采用北京科海恒生科技有限公司生产的 CDAE - 1 声发射检测与分析系统, 采样频率为 1.5 MHz, 门槛值为 48。煤样三轴加载试验以及声发射测试系统如图 2 所示。

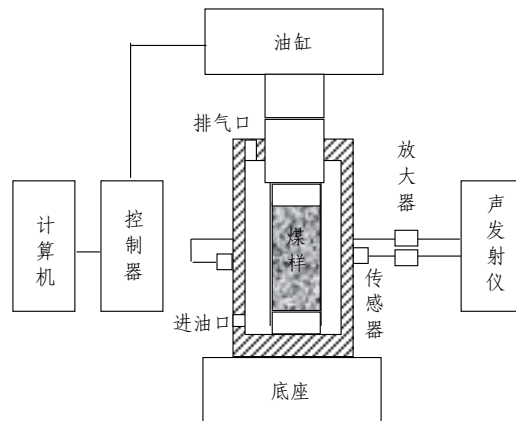


图 2 煤样三轴压缩试验声发射测试系统

Fig.2 Acoustic emission experiment system for coal specimens under triaxial compression

### 2.3 试验方法

煤样分别进行常规单轴、常规三轴和三轴卸围压 3 种应力路径加载, 与苏承东等<sup>[18]</sup>的研究相同, 见图 3。

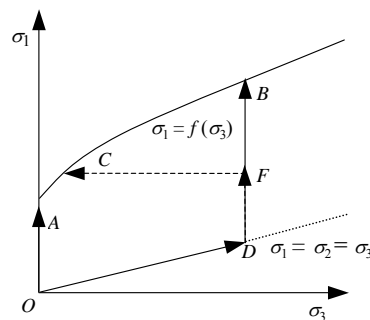


图 3 煤样 3 种加载应力路径

Fig.3 Three kinds of loading stress paths of coal samples

(1) 路径 1: 单轴压缩加载路径为 OA, 采用位移控制方式, 轴向加载速率为 0.005 mm/s, 连续加载至试样完全破坏, 轴向加载与声发射检测同步进行。重复进行 6 个煤样, 其中煤样 M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub> 进行常规单轴压缩试验, 煤样中部两侧对称布置 2 个声发射传感器, 发射传感器与煤样之间用真空脂耦合, 胶带固定; 煤样 M<sub>4</sub>, M<sub>5</sub>, M<sub>6</sub> 放置在三轴筒内, 围压为 0, 三轴缸筒外两侧对称布置 2 个声发射传感器, 发射传感器与三轴筒之间用真空脂耦合, 磁

性压块固定。

(2) 路径 2: 常规三轴加载路径为  $OD \rightarrow DB$ 。采用位移控制方式, 首先按静水压力条件  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , 以 0.5 MPa/s 的加载速率施加围压至 10 MPa, 然后以 0.005 mm/s 的加载速率连续施加轴向载荷至试样完全破坏, 轴向加载与声发射检测同步进行, 重复作 3 个煤样, 其编号分别为  $M_7, M_8, M_9$ 。

(3) 路径 3: 三轴卸围压加载路径为  $OD \rightarrow DF \rightarrow FC$ 。采用载荷控制方式, 首先按静水压力条件  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ , 以 0.5 MPa/s 的加载速率施加围压至 10 MPa, 然后以 1 kN/s 加载速率连续施加轴向载荷至该围压条件下预计极限承载能力的 50%左右, 且超过煤样单轴压缩强度, 然后保持主应力差  $\sigma_1 - \sigma_3$  不变条件下, 以 0.5 MPa/s 逐步降低围压, 直至煤样完全破坏。轴向加载和卸围压过程与声发射检测同步进行, 重复作 3 个煤样, 编号分别为  $M_{10}, M_{11}, M_{12}$ 。

### 3 煤样变形与强度特征

图 4 是 6 个煤样在常规单轴和三轴筒内单轴压缩试验全程应力 - 应变对比曲线。从图中不难看出, 单轴压缩煤样经历压密、弹性、屈服和破坏 4 个阶

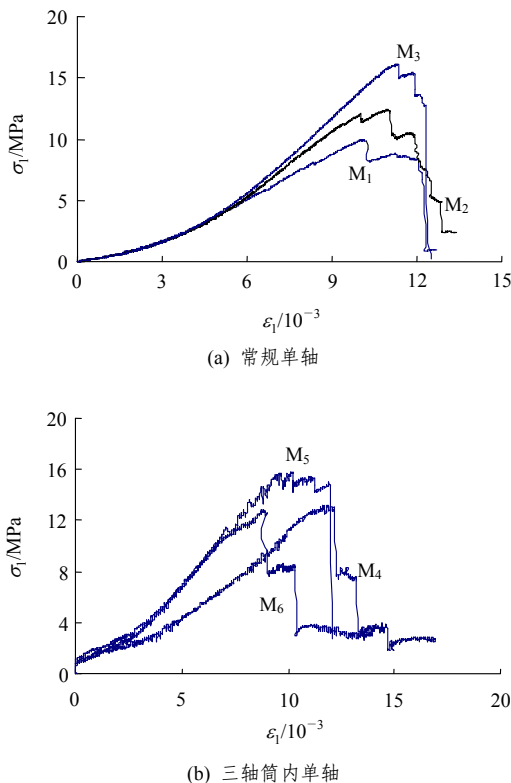


图 4 煤样单轴压缩全程应力 - 应变曲线  
Fig.4 Complete stress-strain curves of coal samples under uniaxial compression

段。两者之间煤样峰值前变形特征大致相同, 峰值后变形特征有所不同, 前者煤样峰值后应力跌落较快, 表现出脆性特征, 后者煤样峰值后分级跌落, 表现出一定残余强度, 可以理解为煤样破坏产生的体积扩容, 三轴筒内油以及放油胶套对煤样破坏扩容具有约束作用的缘故。6 个煤样单轴压缩强度为 9.98~16.06 MPa, 平均强度为 13.38 MPa, 平均模量为 1.25~1.99 GPa, 可以看出试验结果离散较大, 表明煤样的非均质特征明显。

图 5 是 6 个煤样在常规三轴和三轴卸围压试验条件下全程应力 - 应变对比曲线。由图 5(a)可以看出, 与单轴压缩相比, 煤样在 10 MPa 围压作用下, 煤样内部原始裂隙被压密, 在屈服阶段以前应力 - 应变基本成线性关系, 压密阶段不明显, 表现出良好线弹性特征, 平均模量差异变小, 峰后应力跌落迅速, 具有明显峰值点, 表现出脆性破坏特征。

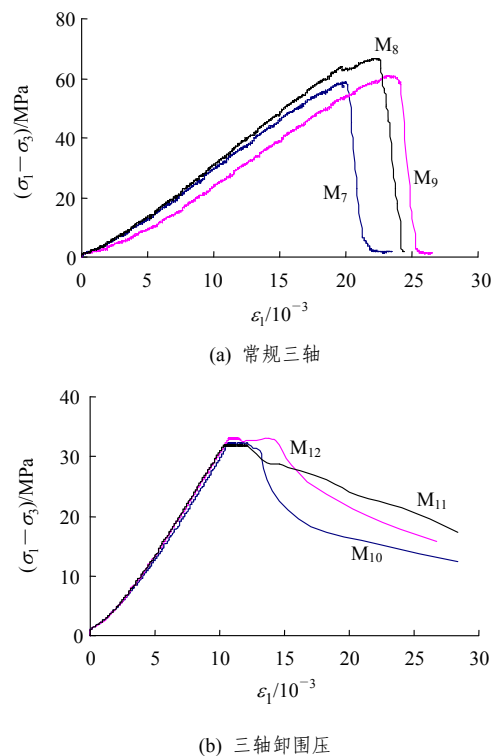


图 5 煤样三轴压缩全程应力 - 应变曲线  
Fig.5 Complete stress-strain curves of coal samples under triaxial compression

煤样  $M_{10}, M_{11}, M_{12}$  三轴卸围压试验全程应力 - 应变曲线见图 5(b)。与图 5(a)相比, 煤样峰值前变形特征大致相同, 应力与应变大致成线性关系, 而在峰值区域变形存在较大差异, 没有明显的峰值点, 卸围压过程出现明显屈服平台, 也就是说位移

增加过程中承载能力保持不变, 这是保持主应力差  $\sigma_1 - \sigma_3$  恒定, 逐步降低围压直至煤样破坏下得到的试验结果。可以解释为在卸围压过程中由正应力提供的摩擦力不断减小, 煤样内部倾角较大的裂隙以及材料强度相对较低不断屈服破坏并产生滑移, 随着围压逐渐减小轴向位移不断增加, 当轴向位移超过极限应变时或轴压  $\sigma_1$  和围压  $\sigma_3$  满足强度条件时, 即达到煤样极限承载状态, 煤样迅速沿主控破裂面宏观滑移, 整体逐渐失去承载能力。与常规三轴压缩相比, 峰后具应力随变形跌落较慢, 具有一定残余应力。

煤样常规单轴、三轴以及三轴卸围压试验的试验结果见表 1。表中  $\sigma_3'$  是指煤样破坏时瞬时围压值,  $\sigma_1'$  是指在该围压条件下的轴向极限承载能力,  $E_0$  是指煤样压缩轴向应力 - 应变曲线线性段的斜率, 称之为平均模量。从表 1 可以看出, 煤样三轴的平均模量明显高于单轴, 三轴以及三轴卸围压试验初始围压条件相同, 平均模量也大致相当, 三轴试验结果离散程度减小, 表明煤样的均质性提高。

表 1 煤样单轴、三轴压缩试验结果

Table 1 Uniaxial and triaxial compression experiment results of coal specimens

煤样编号	直径/mm	长度/mm	加载应力路径	$\sigma_3'$ /MPa	$\sigma_1'$ /MPa	$E_0$ /GPa
M <sub>1</sub>	49.5	6.58		0.00	9.98	1.25
M <sub>2</sub>	49.6	101.10	常规单轴	0.00	12.41	1.72
M <sub>3</sub>	49.7	98.60		0.00	16.06	1.99
M <sub>4</sub>	49.7	100.10	三轴筒内单轴	0.00	13.14	1.23
M <sub>5</sub>	49.7	99.20		0.00	15.85	1.78
M <sub>6</sub>	49.7	99.60		0.00	12.89	1.95
M <sub>7</sub>	49.7	99.40		10.08	68.71	3.41
M <sub>8</sub>	49.7	101.00	常规三轴	10.08	70.83	3.11
M <sub>9</sub>	49.7	98.80		10.08	75.61	3.62
M <sub>10</sub>	49.7	102.60		0.88	33.23	3.23
M <sub>11</sub>	49.7	96.40	三轴卸围压	1.38	34.50	3.33
M <sub>12</sub>	49.7	98.40		3.11	35.07	3.36

## 4 煤样不同路径下的声发射特征

对煤样受压破坏尤其是单轴压缩破坏过程的声发射特征已有广泛的室内研究<sup>[9~12]</sup>, 但对煤样在不同应力路径下变形破坏过程的声发射特征, 特别是煤样所受应力、声发射参数与时间变量之间的关系

研究还不够充分。

众所周知, 在煤样受力变形直至破坏的过程中, 煤样经历压密、弹性、屈服和峰值后塑性变形是非均匀等时变化过程, 对于煤样声发射监测技术的应用来说 主要是依据声发射参数对时间的变化过程来对煤体的稳定性进行评价, 时间是监测预报的一个基本变量, 基于这种思考, 本文试图对煤样进行在不同应力路径下变形破坏全过程声发射检测, 寻找煤样在不同应力路径下变形破坏过程中的声发射特征。

反映煤岩声发射特征有多个参数, 本文采用声发射计数( $N$ )、累计计数( $\Sigma N$ )、声发射能量( $E$ )和累计能量( $\Sigma E$ )来分析煤样在不同应力路径下变形破坏过程中的声发射特征。声发射计数( $N$ )为单位时间内所检测到的振铃计数, 也称振铃数; 声发射计数( $N$ )能反映了声发射发生的频度; 声发射能量( $E$ )是指单位时间内所观测的全部事件的发射能量的总和, 与所检测到的事件所在波形幅度值的平方成正比, 并与声发射仪前置放大器倍数、门槛值、采用频率等因素有关, 是由声发射自动采集的相对能量变化值, 声发射能量( $E$ )反映了声发射事件的强弱。

12 个煤样不同应力路径下变形破坏过程中的声发射测试结果见表 2。

表 2 煤样不同加载应力路径下声发射测试结果

Table 2 AE test results of coal samples under different loading stress paths

煤样编号	加载应力路径	$\ln(N/(次 \cdot s^{-1}))$	$\ln E$	$\Sigma(\ln(N/(次 \cdot s^{-1})))$	$\Sigma(\ln E)$
M <sub>1</sub>		6.89	20.54	57 056	411 229
M <sub>2</sub>	常规单轴	8.05	21.93	81 579	565 448
M <sub>3</sub>		7.86	21.66	62 480	434 571
M <sub>4</sub>		6.38	20.11	16 380	10 461
M <sub>5</sub>	三轴筒内单轴	7.65	21.15	17 173	110 606
M <sub>6</sub>		8.16	21.70	9 335	61 590
M <sub>7</sub>		9.49	22.76	17 352	156 507
M <sub>8</sub>	常规三轴	8.04	21.35	12 760	99 429
M <sub>9</sub>		8.87	22.04	45 907	425 271
M <sub>10</sub>		10.30	24.21	19 178	107 506
M <sub>11</sub>	三轴卸围压	10.19	23.64	12 830	74 124
M <sub>12</sub>		10.22	24.19	17 307	107 375

注:  $\ln N$ ,  $\ln E$  分别为煤样破坏瞬时的声发射计数和能量值;  $\Sigma(\ln N)$ ,  $\Sigma(\ln E)$  分别为煤样破坏全过程声发射计数和能量累计值。

### 4.1 单轴压缩的声发射特征

图 6 给出煤样 M<sub>1</sub> 常规单轴压缩变形破坏过程中的声发射特征检测结果(限于篇幅, 煤样 M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub> 声发射特征检测结果略)。

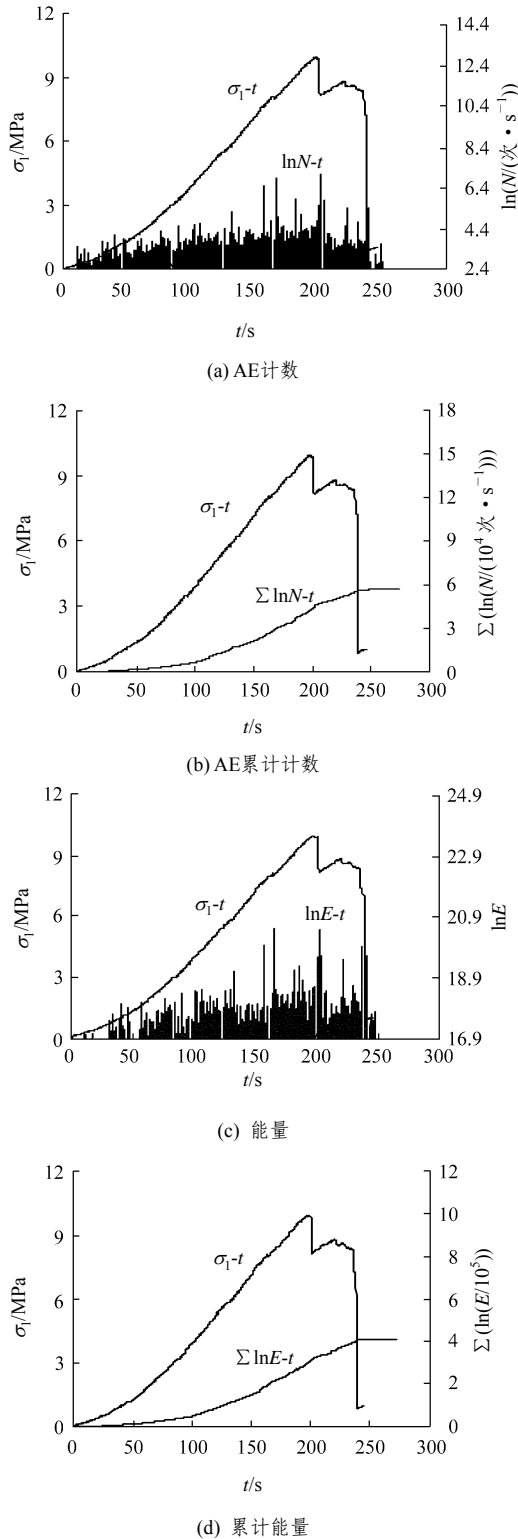


图 6 煤样 M<sub>1</sub> 常规单轴压缩试验声发射检测结果

Fig.6 Acoustic emission test results of coal sample M<sub>1</sub> under uniaxial compression

从图 6 可以看出, 常规单轴压缩变形破坏过程中的声发射特征有以下规律:

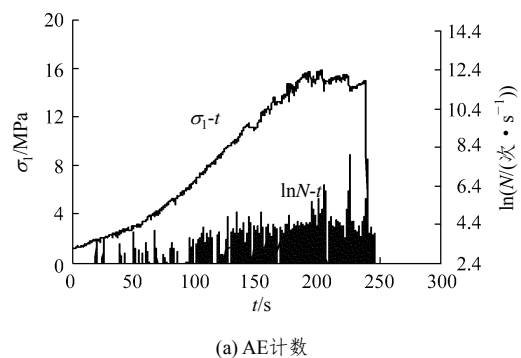
(1) 煤样加载初期压密阶段, 有不同程度的声发射活动, 小事件开始出现, 声发射的计数和能量较少。可以理解为煤样在较低的应力作用下, 内部某些原始裂纹开始闭合, 闭合过程及闭合后部分粗糙面咬合破坏都会产生声发射事件, 能量较低, 往往具有很大的波动性。

(2) 随着载荷的缓慢增加进入弹性阶段, 声发射活动仍然较少, 该阶段煤样所受应力不足以形成新微裂纹, 应力 - 时间大致呈线性关系, 但煤样内部某些闭合的裂纹之间发生滑移, 因此, 也会产生能量较低的声发射事件。

(3) 继续增加载荷进入屈服阶段, 应力 - 时间曲线偏离直线, 表现出煤样的初步损伤发展过程, 煤样内部微裂纹逐渐产生, 出现扩容现象。此阶段发射事件开始趋于活跃, 声发射计数和能量逐渐增加, 可以作为判定煤样破坏的前兆。

(4) 一旦载荷达到煤样的极限承载能力进入破坏阶段, 某些微裂纹发生聚合、贯通, 导致了宏观破裂面的形成, 裂纹之间的相互作用开始加剧, 声发射活动异常活跃, 破坏瞬时声发射计数和能量均达到最大值, 随后煤样内部沿某破裂面产生宏观滑移, 在滑移初期由于摩擦作用使得煤样纵向出现拉应力, 应力迅速跌落过程中, 声发射计数和能量仍然较高, 声发射事件随应力的降低而逐渐减少。

由于煤样常规单轴与三轴筒内单轴压缩试验时声发射传感器布置方式不同, 煤样破坏时声发射传感器接受到的声发射信息有所差异。图 7 给出煤样 M<sub>5</sub> 三轴筒内单轴压缩变形破坏过程中的声发射特征检测结果(限于篇幅, 煤样 M<sub>4</sub>, M<sub>6</sub> 声发射特征检测结果略)。与图 6 相比, 煤样变形破坏过程中的声发射特征存在差异, 主要表现在煤样加载初期压密阶段, 此阶段声发射事件很少, 声发射计数较少,



(a) AE 计数

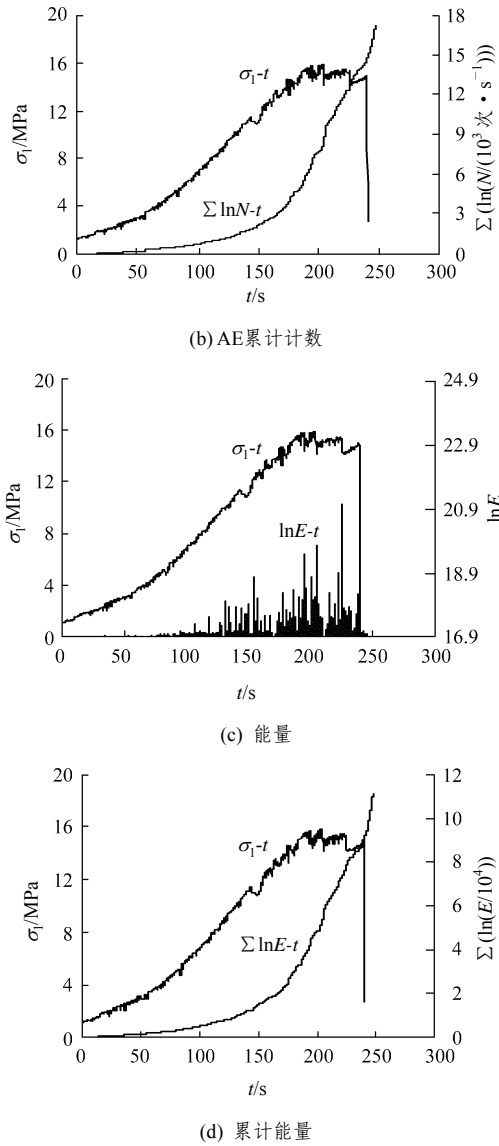


图 7 煤样 M<sub>5</sub> 三轴筒内单轴压缩试验声发射检测结果  
Fig.7 Acoustic emission test results of coal sample M<sub>5</sub> under uniaxial compression in triaxial cylinder

能量也相对较低, 弹性阶段声发射事件有所增加, 屈服阶段声发射事件明显增加, 声发射计数和能量均有较大增加。

从表 2 看以可出, 6 个煤样常规单轴压缩与三轴筒内单轴压缩破坏瞬时检测到的声发射计数和能量大致相当, 破坏过程检测到的声发射累计计数和能量前者明显大于后者。可以理解为三轴筒内煤样加载变形破坏过程中, 其内部微裂纹或滑移产生能量较小的声发射事件被三轴筒内液压油所吸收, 声发射传感器未能接收到, 一旦煤样所荷载荷达到屈服阶段后, 煤样逐步进入屈服破坏产生能量较高的声发射事件, 才能被布置在三轴筒外侧声发射传感器接收到, 可见传感器布置在三轴筒外侧, 声发射

检测敏感程度有所降低。

#### 4.2 常规三轴压缩的声发射特征

图 8 给出煤样 M<sub>8</sub> 常规三轴压缩变形过程中的声发射测试结果(限于篇幅, 煤样 M<sub>7</sub>, M<sub>9</sub> 声发射特征检测结果略)。

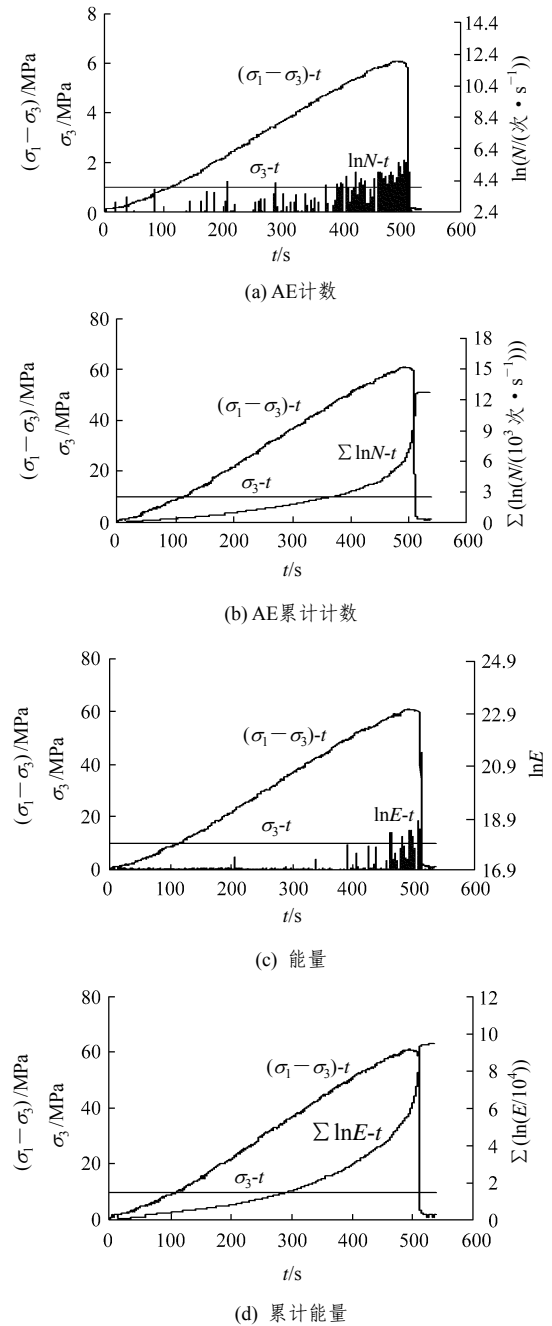


图 8 煤样 M<sub>8</sub> 常规三轴试验声发射测试结果  
Fig.8 Acoustic emission test results of coal sample M<sub>8</sub> under triaxial compression

从图 8 中可以看出, 煤样常规三轴压缩变形破坏过程中的声发射特征有以下规律:

- (1) 煤样加载初期压密阶段, 应力 - 时间曲线



出现稍有上凹，应力速率逐渐增加，此阶段有不同程度能量较低的声发射事件出现，与单轴压缩相比，声发射计数和能量明显减少。这解释为煤样在 10 MPa 围压作用下内部某些原始裂纹已闭合，在轴向应力增加过程中，已经闭合后部分粗糙面咬合破坏会产生能量较低的声发射事件。

(2) 随着荷载的缓慢增加进入弹性阶段，由于围压的作用下轴向应力不足以形成微裂纹，材料处于弹性状态，应力 - 时间保持线性关系，应力速率基本恒定，但煤样试样内部某些闭合的裂纹之间同样会发生滑移，也会有产生能量较低的声发射事件，声发射活动仍然较少。

(3) 继续加载进入屈服阶段，应力 - 时间曲线偏离直线，应力速率逐渐降低，表现出煤样的初步损伤发展过程，煤样内部微裂纹开始形成出现扩容现象，声发射事件逐渐趋于活跃，计数和能量大幅度增大，标志煤样破坏前兆。

(4) 一旦应力达到煤样的极限承载能力进入破坏阶段，煤样内部微裂纹发生聚合、贯通，从而导致了宏观破裂面的形成，裂纹之间相互作用开始加剧，声发射事件异常活跃，声发射计数和能量迅速提高，煤样破坏瞬时声发射计数和能量均达到最大值。而后煤样沿某破裂面产生宏观滑移，轴向应力迅速跌落，煤样整体失去承载能力，声发射事件又迅速减少，声发射计数和能量也随即降低。

### 4.3 三轴卸围压的声发射特征

图 9 给出煤样 M<sub>11</sub> 三轴卸围压变形破坏过程中的声发射检测结果(限于篇幅，煤样 M<sub>10</sub>, M<sub>12</sub> 声发射特征检测结果略)，初始围压为 10 MPa。与图 8 比较，煤样在三轴卸围压变形破坏过程中声发射特征有以下规律：

(1) 在卸围压前材料仍处于弹性状态，应力 - 时间仍然保持良好线性关系，应力速率恒定，煤样在轴向和围压作用下某些闭合裂纹之间会发生滑移，只产生能量较低的声发射事件，声发射计数较少，能量也相对较低。

(2) 当轴向载荷加载至该围压条件下预计极限承载能力的 50 % 左右，且超过煤样单轴压缩强度，在保持主应力差  $\sigma_1 - \sigma_3$  恒定条件下，逐步降低围压使试样进入屈服破坏阶段，声发射事件开始逐渐增加，声发射计数和能量有较大增加，见图 9(a)和(c)。声发射累计计数和能量出现急剧增加，见图 9(b)和(d)，与图 8 相比，在卸围压过程中出现明显屈

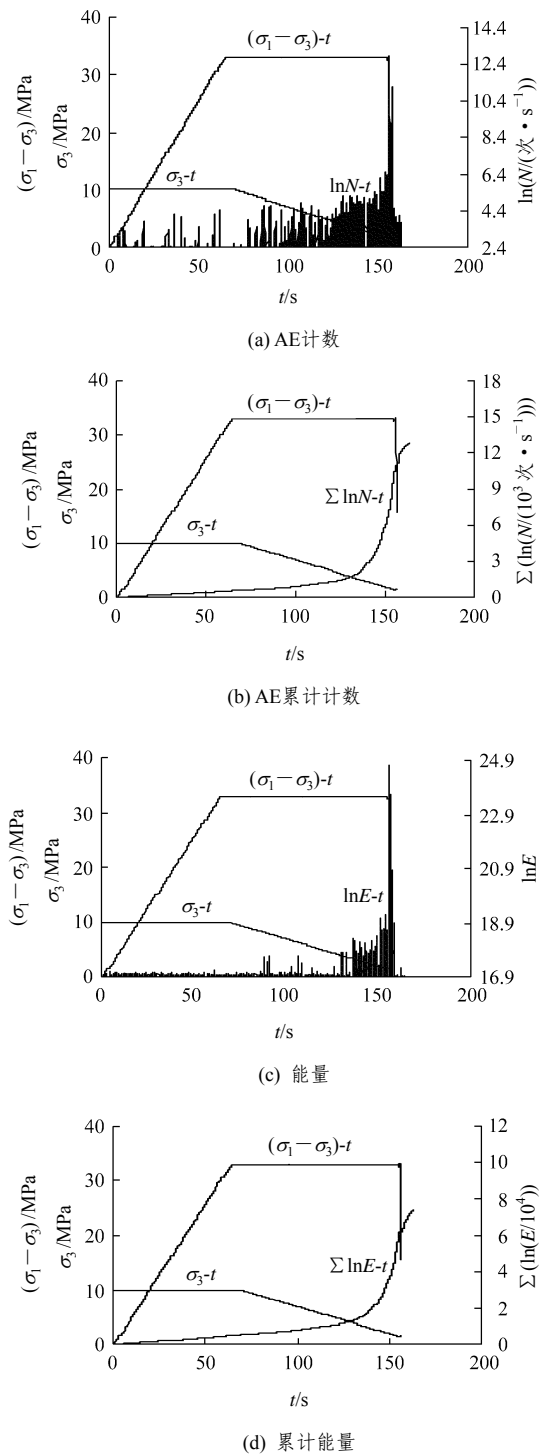


图 9 煤样 M<sub>11</sub> 三轴卸围压试验声发射测试结果  
Fig.9 Acoustic emission test results of coal sample M<sub>11</sub> under triaxial confining pressure relief

服平台，没有明显峰值点，表明在卸围压过程中由正应力提供的摩擦力不断减小，煤样内部某区域材料强度相对较低不断屈服破坏形成微裂纹。在卸围压过程中，前期产生只有少量声发射事件，声发射计数较少，能量也较低，后期声发射事件逐渐趋于活跃，计数和能量大幅度增大，累计计数和能量与



时间关系曲线出现拐点, 标志煤样卸围压破坏前兆。

(3) 随围压继续降低, 一旦轴向变形达到极限变形或轴向应力  $\sigma_1$  和围压  $\sigma_3$  满足强度条件, 内部微裂纹发生聚合、贯通, 裂纹之间相互作用开始加剧, 从而导致了宏观破裂面形成, 煤样沿主控破裂面宏观滑移迅速失去承载能力, 经历 0.2 s 的时间。破坏瞬时声发射事件异常剧烈, 声发射计数和能量同步达到最大值。当轴向应力跌落到最低时, 声发射事件又迅速减少, 声发射计数和能量也随降低。

#### 4.4 不同加载路径下的声发射特征

根据上述不同路径下加载煤样变形破坏过程中的声发射特征分析, 可以看出, 煤样变形破坏过程中的声发射参数与加载路径有关, 图 10 给出 12 个煤样不同应力路径下破坏瞬时声发射计数、能量与加载路径的关系。

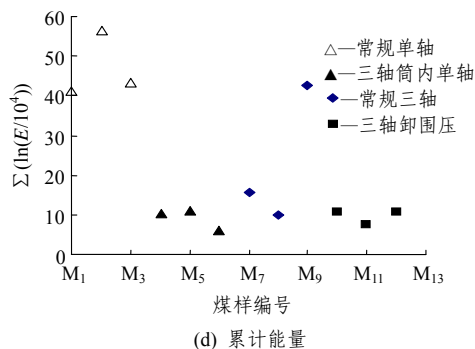
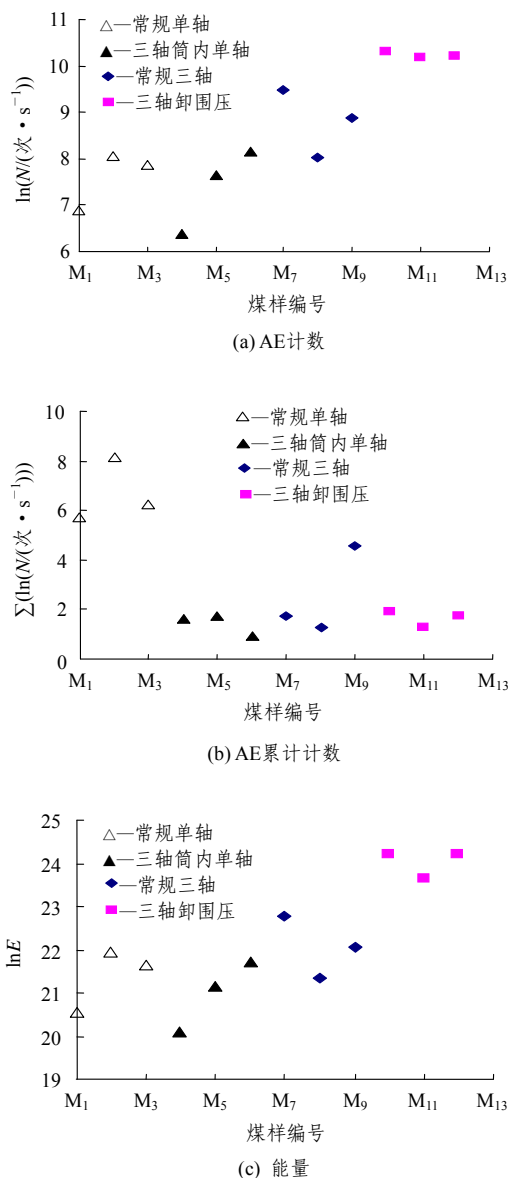


图 10 煤样声发射计数、能量与应力路径的关系

Fig.10 Relationship between AE counts, energy and stress paths of coal samples

尽管试验结果具有一定离散性, 由于煤样自身非均质性所致, 但声发射计数、能量与应力路径之间仍然具有一定规律性。从图 10(a), (c)可以看出, 常规单轴与三轴筒内单轴压缩破坏瞬时声发射计数和能量大致相当, 没有明显差异。与单轴压缩相比, 常规三轴压缩试验煤样破坏瞬时, 声发射计数与能量均有所增大。与常规三轴压缩相比, 卸围压试验煤样破坏瞬时声发射计数更大, 能量则更高, 表明三轴卸围压破坏时更加强烈。

从图 10(b), (d)看出, 常规单轴与三轴筒内单轴压缩破坏时, 声发射累计计数和能量相差较大, 常规单轴压缩煤样破坏时累计计数和能量明显偏大。除煤样 M<sub>9</sub> 外, 其余 8 个煤样在三轴筒内进行单轴、常规三轴压缩和三轴卸围压试验煤样破坏声发射累计计数和能量大致相同, 没有明显差异。

## 5 结 论

利用 RMT - 150B 岩石力学试验机对义马耿村煤样进行常规单轴、三轴和三轴卸围压试验, 研究了煤样在不同应力路径下变形破坏过程中声发射特征, 得出以下几点初步结论:

(1) 常规单轴压缩时各个阶段均有不同程度的声发射事件, 与三轴筒内单轴压缩相比, 声发射累计计数和能量明显偏大, 破坏瞬时的声发射计数和能量大致相当。

(2) 常规三轴压缩时, 在围压作用煤样屈服前声发射事件较少, 屈服后声发射事件逐渐趋于活跃, 计数和能量大幅度增大, 标志煤样破坏前兆, 破坏时声发射计数和能量达到最大值。

(3) 三轴卸围压时, 在卸围压前煤样处于弹性

阶段声发射事件较少, 随围压逐渐降低, 由正应力提供的摩擦力不断减小, 煤样内部某区域材料强度相对较低不断屈服破坏形成微裂纹。屈服前期产生少量声发射事件, 屈服后期声发射事件逐渐趋于活跃, 计数和能量大幅度增大, 累计计数和能量与时间关系曲线出现拐点, 标志煤样卸围压破坏前兆, 破坏瞬间计数和能量同时达到最大值, 与常规三轴压缩相比, 声发射计数更大, 能量则更高, 表明三轴卸围压煤样破坏时更加强烈。

(4) 常规单轴压缩煤样破坏产生的声发射累计计数和能量明显偏大, 三轴筒内单轴、常规三轴压缩和三轴卸围压试验时, 煤样变形破坏过程中产生的声发射累计计数和能量大致相同, 没有明显差异。

### 参考文献(References):

- [1] 张晖辉, 颜玉定, 余怀忠, 等. 循环荷载下大试件岩石破坏声发射实验——岩石破坏前兆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 621 - 3 628.(ZHANG Huihui, YAN Yuding, YU Huaizhong, et al. Acoustic emission experimental research on large-scale rock failure under cycling load-fracture precursor of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 621 - 3 628.(in Chinese))
- [2] 余贤斌, 谢 强, 李心一, 等. 直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 137 - 142.(YU Xianbin, XIE Qiang, LI Xinyi, et al. Acoustic emission of rocks under direct tension Brazilian and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 137 - 142.(in Chinese))
- [3] 吴 刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 82 - 85.(WU Gang, ZHAO Zhenyang. Acoustic emission character of rock materials failure during various stress states[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 82 - 85.(in Chinese))
- [4] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(in Chinese))
- [5] 张 茹, 谢和平, 刘建锋, 等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 584 - 2 588.(ZHANG Ru, XIE Heping, LIU Jianfeng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 584 - 2 588.(in Chinese))
- [6] 李元辉, 袁瑞甫, 赵兴东. 不同应力路径对岩石声发射 Kaiser 效应的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(4): 476 - 479.(LI Yuanhui, YUAN Ruifu, ZHAO Xingdong. Effect of different stress paths on Kaiser effect of rock acoustic emission[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2007, 28(4): 476 - 479.(in Chinese))
- [7] 谢 强, 张永兴, 余贤斌. 石灰岩在单轴压缩条件下的声发射特性[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(1): 19 - 24.(XIE Qiang, ZHANG Yongxing, YU Xianbin. Study on acoustic emission of limestone in uniaxial compression test[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, 24(1): 19 - 24.(in Chinese))
- [8] 付小敏. 典型岩石单轴压缩变形及声发射特性试验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 17 - 21.(FU Xiaomin. Experimental study on uniaxial compression deformation and acoustic emission property of typical rocks[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Natural Science), 2005, 32(1): 17 - 21.(in Chinese))
- [9] 刘保县, 赵宝云, 姜永东. 单轴压缩煤岩变形损伤及声发射特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 647 - 650.(LIU Baoxian, ZHAO Baoyun, JIANG Yongdong. Study of deformation-damage and acoustic emission character of coal rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 647 - 650.(in Chinese))
- [10] 杨永杰, 陈绍杰, 韩国栋. 煤样压缩破坏过程的声发射试验[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 362 - 365.(YANG Yongjie, CHEN Shaojie, HAN Guodong. Experimental on acoustic emission during compression rupture procedure of coal sample[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 362 - 365.(in Chinese))
- [11] 曹树刚, 刘延保, 张立强. 突出煤体变形破坏声发射特征的综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 2 794 - 2 799.(CAO Shugang, LIU Yanbao, ZHANG Liqiang. Study on characteristics of acoustic emission in outburst coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 2 794 - 2 799.(in Chinese))
- [12] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤体破裂声发射的频谱特征研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3): 289 - 292.(WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, et al. Study on frequency spectrum characteristics of acoustic emission in coal or rock deformation and fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3): 289 - 292.(in Chinese))
- [13] 窦林名, 何学秋. 煤岩冲击破坏模型及声电前兆判据研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 504 - 508.(DOU Linming, HE Xueqiu. Model for rock burst failure and its critical values of acoustic and electromagnetic emission[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(5): 504 - 508.(in Chinese))
- [14] 张广清, 金 衍, 陈 勉. 利用围压下岩石的凯泽效应测定地应力[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 360 - 363.(ZHANG Guangqing, JIN Yan, CHEN Mian. Measurement of in-situ stresses by Kaiser effect under confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 360 - 363.(in Chinese))
- [15] 蒋 宇, 葛修润, 任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1 810 - 1 814.(JIANG Yu, GE Xiurun, REN Jianxi. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1 810 - 1 814.(in Chinese))
- [16] 江进辉, 郭琴玲, 周创兵, 等. 大理岩受压声发射研究[J]. 中国农村水利水电, 2005, (11): 72 - 74.(JIANG Jinhui, GUO Qinling, ZHOU Chuangbing, et al. Research on AE characteristics of marble with different water contents[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005, (11): 72 - 74.(in Chinese))
- [17] 李俊平, 周创兵. 岩体的声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 374 - 378.(LI Junping, ZHOU Chuangbing. Experimental research on acoustic emission characteristics of rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 374 - 378.(in Chinese))
- [18] 苏承东, 翟新献, 李永明, 等. 煤样三轴压缩下变形和强度的分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 2 963 - 2 968.(SU Chengdong, ZHAI Xinxian, LI Yongming, et al. Study on the deformation and strength of coal samples in triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2 963 - 2 968.(in Chinese))